

Projet Scientifique et Activités d'Enseignement 2017 - 2021

Centre Observation, Impacts, Energie

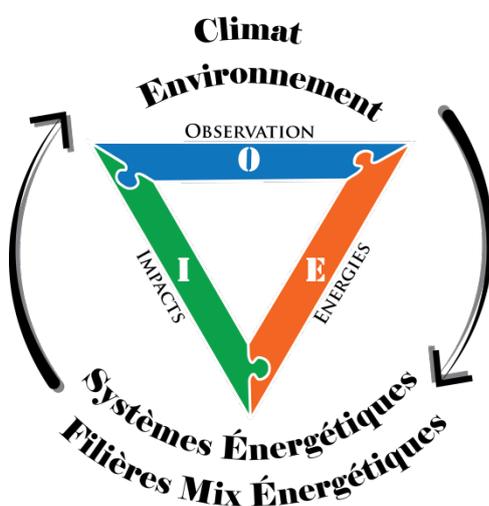
2017-01-10

Ce texte présente le projet scientifique du centre Observation, Impacts, Energie (O.I.E.) et ses activités d'enseignement pour la période 2017-2020. Le centre est rattaché au Département Énergétique et Génie des Procédés de MINES ParisTech.

1 Le centre O.I.E.

O.I.E. a été créé le 1^{er} janvier 2013. Au 31 décembre 2016, il était composé d'une responsable administrative, de sept chercheurs permanents, d'un ingénieur de recherche, de deux chercheurs non permanents, de quatre doctorants, de formations initiales en physique, mathématique ou informatique. Un chercheur en *tenure track* intégrera le centre en février 2017 et un chercheur confirmé le quittera en 2018 pour un départ à la retraite. Aucune autre évolution majeure du personnel n'est prévue dans la période 2017-2020 ; O.I.E. comprendra alors typiquement neuf permanents, deux à trois chercheurs non-permanents, et trois à quatre doctorants.

2 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 sur leurs ressources et impacts.

O.I.E. veut rester 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, en observant le climat et l'environnement, en évaluant les ressources, et les impacts de la production et de l'usage des énergies renouvelables.

3 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).

Même si le centre a acquis des connaissances et compétences en énergie éolienne, l'évaluation et la modélisation des ressources énergétiques renouvelables concernent principalement l'énergie solaire et les énergies marines (EMR). 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. Par exemple, on caractérise les composantes directe et diffuse de l'éclairement ainsi que leur distribution spectrale. Les recherches dans le domaine des impacts environnementaux explorent notamment le concept d'analyse de cycle de vie (ACV) de filières et de produits industriels avec leurs aspects géographiques afin de les caractériser spatialement.

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.

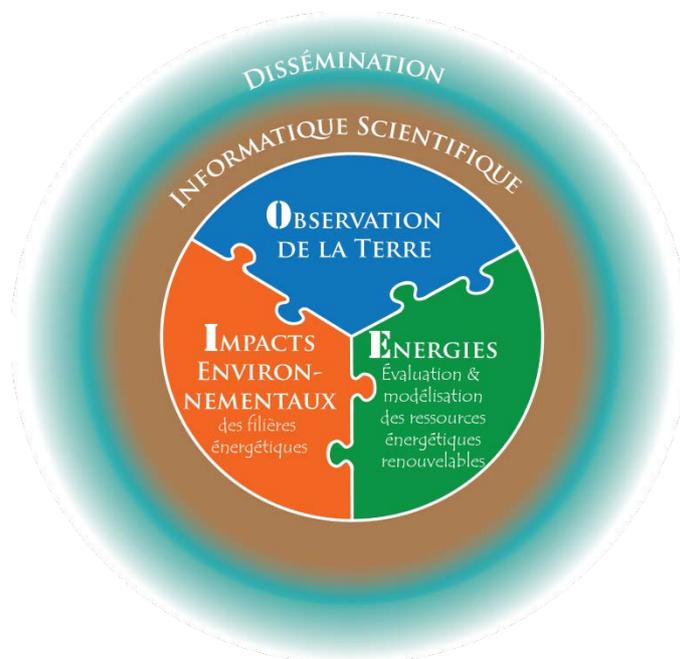
Les verrous scientifiques sont liés à la variabilité spatio-temporelle, à la précision et la propagation des incertitudes d'évaluation des ressources énergétiques renouvelables et des impacts environnementaux. Pour ces derniers, une complexité additionnelle est due aux interactions entre filières énergétiques, et à l'articulation entre ACV et scénarios énergétiques.

Les objectifs généraux d'O.I.E. sont de lever ces verrous et 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.

4 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.

4.1 Structuration de l'activité



Les deux axes de recherche principaux sont **l'évaluation et la modélisation des ressources énergétiques renouvelables** et les **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, et les données fournies par les modèles numériques. Le centre a acquis des connaissances et des compétences reconnues sur les plans académiques et industriels dans ce domaine, notamment dans la fusion de données et la détection des changements. Ces techniques destinées tout d'abord à

¹ Le GEO est un partenariat basé sur le volontariat et regroupe 103 pays et la Commission Européenne, ainsi que 103 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.

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 mis en œuvre par les grandes agences européennes et spatiales.

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. et l'institut météorologique finlandais, est la mise au point d'une nouvelle paramétrisation du calcul de la transmissivité de l'atmosphère due à l'absorption de l'ozone, dans le code numérique de transfert radiatif libRadtran. Tout en se révélant beaucoup plus rapide, elle a permis de réduire l'erreur relative (RMSE) de 123 % à 1%. L'équipe européenne de développement de libRadtran a intégré ce résultat dans la nouvelle version du code. Grâce à cette paramétrisation, les simulations du rayonnement solaire descendant ou montant faites par libRadtran sont beaucoup plus proches de la réalité pour les courtes longueurs d'onde dans l'ultraviolet.

La **dissémination** et le **partage** 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 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 35 000 utilisateurs en 2015.

Le projet SoDa a également permis à O.I.E. de prouver sa capacité à fournir à une large communauté d'acteurs des énergies renouvelables, les moyens technologiques pour valoriser les résultats de leurs travaux de recherche. 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 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 chainage.

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>

Cette activité de diffusion et de partage fait partie intégrante de la stratégie des chercheurs du centre dans les phases de conception et de développement de tous les nouveaux projets de recherche.

4.2 Les activités de recherche

4.2.1 Evaluation et modélisation des ressources énergétiques renouvelables

4.2.1.1 Rayonnement solaire

Les recherches et développements de méthodes de traitement des observations faites par des satellites pour estimer l'éclairement solaire disponible au sol seront poursuivis. On visera à améliorer la précision et la fiabilité des estimations, notamment les composantes directe et diffuse ainsi que leur distribution spectrale, et à enrichir les bases de données de rayonnement existantes.

O.I.E. continuera le développement de la méthode Heliosat-4, en partenariat avec le DLR, le centre aérospatial allemand. Heliosat-4 représente une avancée très notable en ce qui concerne la qualité de l'évaluation et 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.

Heliosat-4 est mis en œuvre opérationnellement dans le Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) pour la partie rayonnement depuis janvier 2016. Membre de CAMS, O.I.E. y sert de référent scientifique, effectue l'évaluation de la qualité des produits, et propose des améliorations des méthodes.

O.I.E. poursuivra l'application opérationnelle de la méthode Heliosat-2 en collaboration avec la société Transvalor, afin de créer ou actualiser des bases de données de rayonnement solaire, appelées HelioClim. Ces bases diffèrent entre elles par les images satellitaires utilisées en entrée et par le pas temporel d'observation (quart-horaire, horaire, journalier). Le nombre d'accès à ces bases de données (plus de 4,5 millions en 2015) démontre l'intérêt de HelioClim pour la science et l'entreprise. Le grand nombre d'utilisateurs de HelioClim et la diversité des applications ont fait apparaître de nouveaux défis à relever, comme par exemple, l'influence du contenu de la colonne atmosphérique en vapeur d'eau sur le rendement d'une centrale solaire qui ne tient pas compte de la modification de la distribution spectrale de l'éclairement total selon la technologie PV employée, ou encore les réflexions 3D des nuages non modélisées et qui s'exercent pour les grands angles de visée ou d'éclairement.

Pour élargir son champ d'observation, O.I.E. développera une nouvelle 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 se veut 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 un capteur spatio-porté, comme libRadtran.

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 et de l'action COST WIRE, et poursuivis dans la tâche 16 du programme PVPS³ de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE). O.I.E. poursuivra aussi l'exploration de la prévision à l'échelle régionale, notamment pour aider les distributeurs et transporteurs dans le maintien de la qualité de l'électricité.

O.I.E. continuera ses 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). L'objectif est de définir des zones climatiques homogènes selon les échelles de temps, soit pour la prévision à diverses échelles, soit pour la validation des produits issus de capteurs à diverses échelles.

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. O.I.E. poursuivra les travaux relatifs à l'amélioration des procédures de validation et d'estimation de la qualité des estimations.

O.I.E. poursuivra sa participation à la normalisation des définitions du rayonnement direct en incidence normale et du rayonnement circumsolaire, en lien avec l'Agence Française de Normalisation (AFNOR) et le Centre Européen de Normalisation (CEN).

4.2.1.2 Ressources énergétiques marines renouvelables

O.I.E. développe son expertise dans les énergies marines renouvelables (EMR) depuis quelques années (projets IREMARE et suivants). L'exploitation de bases de données des états de mer, de courantologie et de météorologie sera poursuivie afin de créer un ensemble d'informations adaptées aux besoins des entreprises. L'innovation porte sur l'exhaustivité des informations générées, leur très haute résolution spatiale, et sur la stratégie de leur mise à disposition selon les principes de données ouvertes et interopérables leur assurant une très grande capacité de diffusion.

Par le biais d'une thèse de doctorat, O.I.E. explore les possibilités offertes par l'imagerie radar de cartographier la bathymétrie par faible profondeur (moins de 100 m) avec la précision et la qualité requises par les industriels des EMR. La bathymétrie est en effet une variable clé pour les EMR. Elle est une entrée essentielle dans les modèles hydrodynamiques marins qui simulent les caractéristiques du gisement et de l'écoulement. Elle conditionne également le choix des technologies permettant d'extraire de l'énergie.

³ PVPS : Photovoltaic Power Systems Programme (iea-pvps.org)

O.I.E. explorera la possibilité d'ouvrir un axe de recherche transdisciplinaire portant sur la simulation hydrodynamique à très haute résolution et l'exploitation des données d'observation de la Terre au service des EMR, en associant les compétences d'autres centres de recherche de MINES ParisTech.

4.2.1.3 Evolution du climat et énergies renouvelables

Les activités du centre dans la prise en compte de l'évolution du climat pour l'évaluation des ressources sont récentes et prennent essentiellement place dans le cadre du service européen *Copernicus Climate Change Service (C3S)*.

O.I.E. poursuivra l'évaluation de la qualité des estimations de l'éclairement disponible au sol, proposées par les ré-analyses météorologiques, comme MERRA-2 et ERA-5. L'ajustement de ces estimations sur les bases HelioClim-3 ou CAMS, par des méthodes de type *quantile mapping*, ont déjà permis de réduire significativement leur biais par rapport à des mesures in situ.

O.I.E. créera une longue série d'irradiation journalière, depuis 1985, sur la zone observée par les satellites Meteosat, harmonisée, en combinant HelioClim-1 (1985-2005) et HelioClim-3 (depuis 2004). Ceci représente la prise en compte d'environ dix systèmes Meteosat ayant des résolutions spatiales et temporelles différentes.

4.2.2 Impacts environnementaux des filières énergétiques

Les indicateurs de développement durable sont des outils 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 pertinentes de développement durable. O.I.E. contribue à la définition de ces indicateurs de développement ou d'impact et à leur évaluation, en s'intéressant particulièrement aux aspects spatio-temporels et à l'évaluation des incertitudes.

4.2.2.1 Modélisation spatiale des filières énergie et de leurs impacts environnementaux par ACV

Nos recherches explorent le concept d'analyse de cycle de vie (ACV) de filières et de produits industriels dans le domaine de l'énergie. O.I.E. y intègre les aspects géographiques afin d'évaluer des impacts environnementaux caractérisés spatialement. Il s'agit d'un effort de recherche sur le long terme, abordé en collaboration avec d'autres équipes en France et en Europe. Pour l'aspect géographique, notre approche consiste à intégrer, pour un système énergétique renouvelable, (1) les ressources énergétiques (par exemple, la ressource éolienne ou solaire) caractérisées géographiquement comme entrées de l'ACV, (2) la spatialisation de la filière nécessaire en raison de la mondialisation de son cycle de vie. Des impacts spatialisés pour ces filières énergies renouvelables sont ainsi générés et nous évaluons leur qualité, et le bénéfice apporté par la discrimination spatiale.

Cette spatialisation des impacts se concrétise notamment par la réalisation de services Web pour des filières renouvelables avec, par exemple, un service pour l'AIE pour la filière photovoltaïque : ENVI-PV⁴. Ce service exploite des inventaires de cycle de vie moyens qui prennent en compte la production du photovoltaïque selon la distribution actuelle dans le marché.

⁴ ENVI-PV : viewer.webservice-energy.org/project_ia

O.I.E. améliorera ce service Web. De nouveaux inventaires modulaires seront développés qui permettront de modéliser les différents éléments d'un système photovoltaïque selon la localisation géographique de la production et de modéliser les différentes configurations et chaînes de production possibles avec plus de flexibilité.

Selon la même approche qu'ENVI-PV, de nouveaux services Web verront le jour pour chaque filière renouvelable étudiée au sein d'O.I.E.

4.2.2.2 Intégration des incertitudes dans les études ACV

- La propagation des incertitudes

L'accès à la connaissance des incertitudes des impacts environnementaux nécessite l'intégration des incertitudes associées à chaque paramètre dans les inventaires de cycle de vie. La définition des éléments pour le développement des inventaires modulaires décrits dans la sous-section précédente inclura le rassemblement des données pertinentes pour l'obtention et la caractérisation de ces incertitudes.

- La simplification des modèles par analyse globale de sensibilité : des outils pour les décideurs

Les études d'estimation des impacts environnementaux par analyse de cycle de vie sont généralement lourdes à mettre en œuvre. On poursuivra la conception et la réalisation de nouveaux outils plus aisés à manier, basés sur la réduction de modèles ACV pour les filières renouvelables. Cette réduction s'appuie sur l'analyse globale de la variabilité des paramètres définissant une filière énergétique et identifie les facteurs clés déterminants à toute prise de décision en termes de localisation ou de choix technologique.

4.2.2.3 Cycle de vie de technologies innovantes

Jusqu'à maintenant, l'expérience d'O.I.E s'est concentrée sur les énergies renouvelables d'origine non-biologique (éolienne, solaire, géothermique...). Nous étudierons les énergies renouvelables d'origine biologique en nous positionnant sur la filière biomasse, filière d'avenir. Nous développerons notamment des collaborations pour l'évaluation de la production de la filière bois-énergie au niveau de territoires.

Afin de contribuer à la décarbonisation des procédés et combustibles, nous explorerons les partenariats potentiels pour l'évaluation environnementale des systèmes basés sur la production d'algues ainsi que des systèmes de réduction de gaz à effet de serre tels que les technologies de capture de CO₂.

O.I.E. développera des inventaires pour d'autres technologies avancées de production, tels que les systèmes photovoltaïques intégrant des éléments de réflexion du rayonnement solaire (sur la forme de miroirs) pour l'amélioration de l'efficacité et de la performance environnementale.

4.2.2.4 Articulation entre ACV et scénarios énergétiques

Les évaluations environnementales par filière doivent être conduites en tenant compte des spécificités technologiques locales et prenant en compte les aspects temporels afin de mieux participer à la transition énergétique. Elles nourrissent la comparaison des bouquets énergétiques de production électrique sur des territoires, y compris dans une vision prospective. L'évaluation des

impacts générés par des choix de filières sur ces bouquets révèle les filières ayant le plus d'impact selon les différents indicateurs sélectionnés, mais révèle également les tendances contradictoires de ces choix sur les différents impacts. Cette approche contribue ainsi à peser sur des décisions de choix de scénarios énergétiques, de planification sur un territoire et d'appréhender les enjeux d'un développement d'énergie durable grâce à l'optimisation des ressources locales (renouvelables ou non) pour répondre à la demande en énergie sur des durées temporelles longues, à la maîtrise des flux d'importation de combustibles fossiles, de biomasse ou d'électricité et bien sûr à la minimisation des «fuites environnementales» à l'instar des fuites carbone.

O.I.E. poursuivra l'évaluation de scénarios énergétiques prospectifs aux horizons 2030 et 2050 et l'analyse des effets environnementaux liés aux possibles contextes technico-politiques. En outre, il étudiera la prise en compte des « services-système » pour permettre une forte intégration des énergies renouvelables à production intermittente, notamment à l'aide des dispositifs comme des générateurs électriques flexibles, des dispositifs de stockage ou des dispositifs de télécommunication permettant d'adapter la consommation à la production.

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

4.3.1 Formation

O.I.E. contribue et contribuera à l'enseignement sous différentes formes. La diffusion des connaissances fait partie des actions stratégiques permettant d'accroître la visibilité des activités du centre. Les membres du centre participent :

- à l'encadrement des étudiants PESTO (X-Mines) en Energie-Environnement du Corps des Mines,
- à l'encadrement d'élèves du cycle des ingénieurs civils, en option « Machines et énergie » du cycle ingénieur civil de MINES ParisTech,
- à l'encadrement d'un module d'enseignement « Métiers d'Ingénieurs Généralistes » pour les 1A du cycle ingénieur civil de MINES ParisTech,
- à la semaine Athens sur la programmation en C++ (env. 40 élèves),
- aux enseignements au sein des mastères spécialisés ALEF et EnR (éolien, solaire, ACV) et des masters SE (Stratégies Energétiques) de l'Ecole et REST (Sciences et Technologies des Energies Renouvelables) de ParisTech, et à l'encadrement d'étudiants dans le cadre de leur mission de recherche,
- à l'enseignement pour le cycle ingénieur de Chimie ParisTech, spécialité « Energies renouvelables ».

Ses membres organisent en outre :

- un module « Impacts environnementaux » d'une semaine dans le cadre du Mastère spécialisé ALEF de MINES ParisTech,
- un cours doctoral « Advanced LCA » –qu'ils réalisent aussi– au sein de l'École Doctorale : SMI - Sciences des Métiers de l'Ingénieur

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 les membres du centre organisent :

- des sessions de formation continue qualifiante à l'intention d'experts et industriels dans le domaine de l'énergie solaire,
- du *Mentoring* des chercheurs au sein de MINES ParisTech.

Le récent lancement de la « Copernicus Academy⁵ », dont MINES ParisTech, au travers d'O.I.E., est membre fondateur contribuera à maintenir la reconnaissance du centre dans le domaine des applications de l'Observation de la Terre pour la communauté des énergies renouvelables.

Les chercheurs titulaires d'une Habilitation à diriger les recherches encadrent régulièrement des doctorants inscrits dans l'École Doctorale : SMI - Sciences des Métiers de l'Ingénieur.

Afin de prendre en compte l'évolution du paysage de l'enseignement supérieur en France, le centre s'est impliqué et s'impliquera dans le développement des Masters 1 et 2 « Energie » en collaboration avec la Communauté d'Universités et Établissements (COMUE) Paris Sciences et Lettres (PSL). Une action concertée des équipes de MINES ParisTech sera menée prochainement à destination de la COMUE Université Côte d'AZUR (UCA) pour évaluer les collaborations possibles dans l'enseignement relatif à l'énergie.

4.3.2 Production scientifique

Nous poursuivons notre politique de publications de la recherche au travers d'ouvrages, articles, communications et participation aux conférences et colloques internationaux⁶.

O.I.E. favorise et favorisera la prise de responsabilité des chercheurs comme éditeurs associés pour les journaux scientifiques internationaux tels que *Solar Energy* de l'ISES⁷ ou *Journal of Solar Energy Engineering* de l'ASME⁸.

⁵ La commission européenne a lancé la [Copernicus Academy](https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/OIE/search/index/?q=*) le 19 décembre 2016. Le but de cette académie est de développer des cours, des sessions de formation, des stages ainsi que des outils éducatifs et pédagogiques pour permettre aux chercheurs, scientifiques et entrepreneurs d'acquérir des compétences adaptées à l'utilisation et l'exploitation des données Copernicus et de ses services. Cette académie connectera des universités européennes, des institutions de recherche, des écoles de commerce, et organisations tant privées qu'à but non lucratif.

⁶ https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/OIE/search/index/?q=*

⁷ www.journals.elsevier.com/solar-energy

O.I.E. a choisi de mettre l'accent sur la dissémination des résultats de ces recherches à destination de la communauté la plus large possible. Ainsi, bien que les activités soient bien identifiées par les utilisateurs de nos recherches, O.I.E. poursuivra l'opération et le développement de l'IDS webservice-energy.org. L'IDS sera inscrite au cœur de l'initiative sur les énergies renouvelables GEO VENER (*Vision for Energy*) dans le cadre du plan d'actions 2016-2025 de GEO. Cette action renforcera la visibilité de l'IDS et des travaux d'O.I.E. dans la communauté GEO.

Grâce au soutien de la bibliothèque de MINES ParisTech, l'IDS a récemment été labélisée auprès de l'INIST (Institut de l'information scientifique et technique) afin de supporter la génération d'identifiants pour les données digitales, les DOI (Digital Object Identifier). La création de ces identifiants est rendue nécessaire pour l'identification et la mise à disposition des ressources (jeux de données, programmes, algorithmes,...) accompagnant les résultats de la publication d'un article scientifique. Cette capacité nouvelle renforcera nos efforts de diffusion et de partage des connaissances.

4.3.3 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'IRESEN, 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 900 citations scientifiques comptabilisées par le site Web of Science. Ces collaborations seront poursuivies et étendues.

Ce rayonnement et cette attractivité se sont aussi traduits par la signature en 2011, et son renouvellement en 2016, d'un *mémoire* d'entente avec le ministère de l'énergie des mines de l'environnement et de l'eau marocain et de l'Institut de Recherche sur l'Energie Solaire et les Energies Nouvelles (IRESEN), et en 2012 d'un *mémoire* d'entente (en cours de renouvellement) avec le *Masdar Institute of Science and Technology* (MIST, Abu Dhabi, Emirats Arabes Unis). MINES ParisTech est le seul organisme français ayant signé un accord avec le MIST à ce jour.

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.

4.3.4 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.

⁸ solarenergyengineering.asmedigitalcollection.asme.org

Le portail communautaire SoDa (Solar Radiation Database, www.soda-is.com) a permis la fédération de plus de 35 000 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 de cinq emplois d'ingénieurs à plein temps dans cette société.

Le nombre d'accès aux bases HelioClim via le portail SoDa est élevé : plus de 4,5 millions en 2015. 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.

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 sera maintenu dans le cadre du nouveau programme de travail du GEO sur la période 2016-2025.

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) 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.

Au niveau français, citons les acteurs clés du domaine des énergies renouvelables :

- pour l'ADEME, le récent projet IREMARE a pu bénéficier de l'ajout à l'IDS d'un nouveau composant d'infrastructure afin de mettre à disposition un jeu de données unique pour la communauté des énergies marines,
- pour le pôle de compétitivité CAPENERGIES, co-financé par la Direction Régionale PACA ainsi que par le Conseil Général des Alpes Maritimes, notre IDS permet d'héberger et de présenter un atlas solaire régional interactif. Le fait que toutes les données de cet atlas aient été déployées en respectant les normes de l'OGC⁹ permet également de partager ces données de façon interopérable sur le site institutionnel du gouvernement (geoportail.gouv.fr),
- pour des PME, et récemment auprès de la start-up « In Sun We Trust » la mise à disposition du cadastre solaire de la ville de Nantes utilise les services Web accessibles en ligne sur l'IDS.

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 dans ce domaine avec notre participation au projet NextGEOSS (2016-2020), une contribution européenne à GEOSS. Il s'agit d'un des projets phares de la commission européenne dans le cadre du programme H2020. Il illustrera notre capacité à déployer des pilotes industriels relatifs aux énergies renouvelables dans des environnements de types « SaaS » (*software as a service*) dans le « Cloud ».

⁹ Open Geospatial Consortium est un consortium international de 448 compagnies, agences gouvernementales et universités participant à un développement consensuel de standards notamment dans le domaine de l'information géo-localisée. MINES ParisTech est membre de l'OGC depuis 2010.