



CENTRE ÉNERGÉTIQUE ET PROCÉDÉS

Projet scientifique de l'équipe « Observation, Modélisation, Décision » (OMD)

2009 – 2013

- 4 février 2009 -

Isabelle Blanc, Philippe Blanc, François Cauneau, Mireille Lefèvre,
Lionel Ménard, Thierry Ranchin, Lucien Wald

-oOo-

Ce texte présente le **projet scientifique de l'équipe « Observation, Modélisation, Décision »** (OMD) du Centre Energétique et Procédés (CEP) de MINES ParisTech pour la période 2009-2013.

1. OBJET SCIENTIFIQUE DE L'EQUIPE OMD

Le domaine de l'énergie est politiquement sensible et touche à l'indépendance et à la stratégie des entreprises et des pouvoirs publics. Les décideurs ont besoin d'outils d'évaluation et d'analyse des solutions et de leurs impacts, avec une vision systémique aussi bien du point de vue temporel que spatial, les aidant ainsi à mieux définir leurs orientations dans une logique durable. Il faut leur proposer des systèmes permettant l'accès aux données et aux indicateurs pertinents, la synthèse d'informations, la réalisation de scénarios et la prise de décision. Par ailleurs, la production décentralisée d'énergie prend une importance grandissante. La dérégulation européenne du domaine énergétique, l'introduction de grandes quantités d'énergies renouvelables sur les réseaux et la restructuration des réseaux favorisent le développement des moyens décentralisés de production d'énergie. Ces nouveaux modes de production nécessitent une meilleure connaissance des aspects géographiques des systèmes et des réseaux et de leur modélisation.

L'objet scientifique de l'équipe OMD est le développement de méthodes et outils afin d'accroître la capacité de représentation mathématique de la réalité géographique dans le domaine de l'énergie, au moyen de l'observation, la modélisation et la décision. On contribuera ainsi :

- au développement de la météorologie spécifique à l'énergie,
- à l'accroissement de l'usage des énergies renouvelables (EnR) pour la production d'énergie,
- à l'analyse et l'aide à la décision en termes de réduction des impacts environnementaux des transports, de la production et des usages de l'énergie.

On s'efforcera de mieux connaître le milieu au moyen de l'observation et par la modélisation en ce qui concerne les quantités et propriétés inaccessibles par la mesure. La qualité des évaluations des ressources solaire et éolienne doit être améliorée : une ressource mieux connue mènera à une

meilleure évaluation des performances du système de production ; les coûts d'investissement et les incertitudes financières seront mieux évalués ; le suivi et le contrôle du système seront améliorés. Enfin, une bonne connaissance du milieu permet de le surveiller et, en particulier, d'analyser les impacts et les externalités des transports, de la production et des usages de l'énergie. Ces analyses serviront de support aux gestionnaires, notamment ceux de l'espace urbain, dont le rôle se renforce par l'émergence de l'habitat producteur – consommateur.

Les objets auxquels on s'intéresse ont une caractéristique commune : ils comprennent une composante géographique qui les régit de manière importante. La géographie numérique est une des disciplines fondamentales sur lesquelles repose ce projet en énergétique. Les autres disciplines fondamentales sur lesquelles s'appuie l'équipe sont les mathématiques appliquées et la physique (météorologie, météorologie, interactions onde-matière).

2. L'EQUIPE OMD

L'équipe est composée de six enseignants-chercheurs permanents, d'un ingénieur de recherche et de quatre à cinq doctorants, physiciens, mathématiciens ou informaticiens, formant un ensemble uni et s'appuyant sur :

- des disciplines scientifiques fondamentales et appliquées :
 - mathématiques : traitement de l'information, fusion d'informations, statistiques, décision ;
 - physique : météorologie, climatologie, interactions ondes-matière (optique atmosphérique, transfert radiatif) ;
 - météorologie (capteurs satellitaires, radiométrie, mesures de rayonnement) ;
 - environnement : analyse de cycle de vie (ACV), comptabilité environnementale, géographie numérique ;
- et sur les technologies Web, notamment les services Web (applications invocables par Internet).

Une grande habitude de travail collaboratif et des échanges permanents entre les personnes ont abouti à un corpus de connaissances partagées et à un ensemble de logiciels et d'approches génériques, constamment enrichis. La formalisation croissante des approches et méthodes, combinée à leurs applications à des études spécifiques, contribue, d'une part, à l'accroissement des connaissances, et, d'autre part, à l'excellence scientifique. La fusion d'informations en est un exemple. Une première formalisation, dans les années 1990, a permis de comprendre ce qui pouvait relier des travaux sur des sujets divers (climatologie, océanographie, géographie urbaine), à des échelles variées (1 m, 1 km, 1000 km), avec des temporalités variées (de l'instantané à la décennie) et avec des outils diversifiés (statistiques, filtrage, décision, géographie numérique). Ces travaux ont permis à l'équipe de jouer un rôle clé dans la réalisation des premiers systèmes d'information marine, outils pionniers d'aide à la décision opérationnels développés pour le compte d'organismes internationaux¹ et pour l'estimation du coût environnemental de l'exploitation pétrolière. Une deuxième formalisation a dégagé un concept de fusion d'images pour la synthèse de certaines d'entre elles à une meilleure résolution spatiale. Le concept ARSIS² explique la plupart des méthodes publiées dans ce domaine. Pour le CEP, il a permis d'unifier toutes les méthodes de fusion de données : images, profils, sorties de modèles numériques, mesures ponctuelles, autres informations au format « grille » de type géophysique ou géographique, comme l'altitude du terrain ou encore la classe de bâti dans une ville. Les méthodes de fusion apparaissent dans toutes les activités exploitant une représentation d'une réalité géographique : potentiels solaire et éolien, production de l'énergie et maîtrise de la demande, impacts environnementaux des transports, de la production et des usages de l'énergie.

¹ Commission Européenne, Plan des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE)

² Amélioration de la résolution spatiale par injection de structures

3. THEMES DE RECHERCHE

3.1. Météorologie pour l'énergie

Principalement orientée sur l'estimation de la ressource solaire à ses débuts au sein du CEP, l'équipe a su capitaliser sur sa recherche et l'étendre à la ressource éolienne. On poursuivra dans ce thème de la météorologie pour l'énergie, c'est-à-dire la mesure, la modélisation, la prédiction de quantités liées à la météorologie et au climat pour les problèmes appartenant à l'énergie. Ces travaux s'appuient en outre sur de fortes compétences dans le domaine des capteurs, de la modélisation de la chaîne d'acquisition, des mathématiques, du traitement numérique des signaux et des services Web.

3.1.1. Rayonnement solaire

Les observations faites par satellite sont traitées pour créer et actualiser des bases de données de rayonnement solaire. Ces données sont utilisées dans des systèmes d'élaboration de scénarios et d'aide à la décision. Les travaux actuels seront poursuivis afin d'améliorer la précision et la fiabilité des estimations, enrichir les bases de données de rayonnement et augmenter le nombre de paramètres estimés, notamment les composantes directe et diffuse et la distribution spectrale.

La famille d'algorithmes Heliosat pour l'estimation des ressources solaire à partir d'images de satellite, issue de l'École des Mines de Paris au début des années 1980, est depuis devenue un standard international. L'équipe contribue de manière importante à son développement. La version Heliosat-4, en cours de création en partenariat avec le DLR³ et l'Université d'Oldenburg (tous deux en Allemagne), représentera une avancée très notable en ce qui concerne la qualité de l'évaluation et les paramètres qui pourront être retrouvés. On devrait mieux évaluer la distribution spectrale du rayonnement, utile pour le photovoltaïque (PV), la biomasse et les échanges thermiques dans les bâtiments, ainsi que les composantes directe et diffuse sur plan incliné. La connaissance précise de ces composantes est un élément très important pour l'intégration du PV dans l'habitat. Le déploiement opérationnel d'Heliosat-4 est en cours dans un cadre commercial entre le DLR et Armines : le DLR exploite les capacités étendues des nouveaux satellites météorologiques pour produire une description détaillée des paramètres optiques de l'atmosphère, et le CEP/OMD transforme au moyen de modèles cette description en quantités utiles pour l'énergie. La première version opérationnelle devrait être disponible courant 2010. Le principe de cette méthode exploite notamment des connaissances fondamentales en physique de l'atmosphère. De nouveaux capteurs sont en cours de préparation, qui délivreront une information plus riche sur l'atmosphère. La méthode sera continuellement adaptée pour bénéficier de l'évolution de ces connaissances et de l'accroissement de la qualité des données d'entrée.

La famille HelioClim de bases de données est créée par l'application de ces algorithmes Heliosat. Ces bases de données diffèrent entre elles par les paramètres qu'elles contiennent et par le pas temporel d'observation (quart-horaire, horaire, journalier). Une validation permanente de ces données est effectuée par comparaison avec des mesures obtenues par les stations de réseaux météorologiques, afin d'établir ces bases comme standards pour les observations de rayonnement. L'accroissement spectaculaire du nombre d'accès à ces bases de données (50 000 accès en 2008) confirme l'intérêt des données.

Certaines quantités relatives au rayonnement solaire ne sont pas connues suffisamment précisément, comme les températures de l'air, les paramètres optiques des aérosols et la vapeur d'eau atmosphérique. On construira des cartes de ces quantités à de grandes échelles, en fusionnant des informations géographiques, météorologiques et climatiques, et des résultats de modèles. Chacune de ces informations est incomplète, c'est-à-dire qu'à elle seule, elle ne fournit pas une représentation satisfaisante de la quantité recherchée. Par la fusion d'informations, on parvient à synthétiser une meilleure représentation. On a ainsi construit pour le monde, avec un pas d'espace de l'ordre de 50 km, des cartes de l'éclairement solaire sur une période récente : 1990 – 2004, ainsi que des températures de l'air, en moyennes mensuelles (2006), et des cartes de rayonnement UV. De telles cartes n'existaient pas auparavant, et la disponibilité de ces informations, avec leur degré d'incertitude, est un réel progrès.

³ Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt (équivalent de l'agence spatiale allemande).

La dissémination des bases de données est assurée par le service Web SoDa, résultat d'un projet européen. Ce service assure l'interopérabilité des bases de données et des applications réparties dans le monde, pour les combiner et offrir une information de qualité aux utilisateurs. Le service SoDa a été maintenu au sein de l'équipe jusqu'à maintenant et doit être transféré à Transvalor en 2009. Ce transfert permettra un recentrage des activités de l'équipe sur la poursuite des recherches pour une meilleure évaluation du rayonnement et le développement de services adaptés aux besoins des utilisateurs.

Afin d'assurer la pérennité de ce transfert, un effort est en cours pour créer une nouvelle version de SoDa. Cette dernière comprendra un nouveau moteur, doté d'une intelligence plus évoluée et basé sur des standards internationaux. Cet effort informatique a été entrepris au travers d'une collaboration entre le Centre de Recherche en Informatique (CRI) et le CEP/OMD, avec un soutien particulier de l'Ecole (2006-2008). Il entre dans le cadre d'une activité chapeauté par l'Agence Internationale pour l'Energie (2006-2010) et par le GEO⁴ (2005-2015). Ces activités incluront l'utilisation et la participation à l'amélioration des normes dans le domaine des services Web et de leur composition ou chaînage.

Dans ce cadre international et en s'appuyant sur ces efforts d'interopérabilité, l'équipe travaille et travaillera sur des services Web exploitant toutes les sources d'information disponibles, et permettant la synthèse d'informations et la réalisation de scénarios. Ces services permettront notamment aux décideurs de définir leurs orientations. Les applications porteront principalement sur le choix de sites de production d'électricité d'origine solaire.

3.1.2. Energie éolienne

Les satellites d'observation de la Terre offrent un accès à des informations pertinentes pour l'industrie éolienne avec des temporalités et des précisions ne pouvant pas être obtenues facilement par d'autres moyens de mesures. Nos travaux dans ce domaine visent à améliorer la connaissance et la modélisation de la météorologie spécifique à l'éolien et à fournir ces informations de manière opérationnelle. Les usagers principaux des informations seront les investisseurs et autres décideurs pour l'élaboration de scénarios et de prise de décision, ainsi que les opérateurs des fermes éoliennes.

En mer, les observations satellites permettent d'obtenir des informations sur le vent. On dispose ainsi de mesures à basse résolution spatiale (25 à 50 km) et haute résolution temporelle (deux mesures par jour minimum) au large et des mesures à haute résolution spatiale (jusqu'à 400 m) et faible résolution temporelle (de 3 à 35 jours suivant les latitudes et les satellites considérés) près des côtes. Or, les fermes éoliennes *offshore* se développent principalement dans les zones côtières. C'est donc là que l'on doit disposer de roses de vent pour le potentiel éolien, et plus exactement de roses de paramètres de Weibull. Leur obtention représente un effort financier considérable aujourd'hui. On a donc développé une méthodologie exploitant l'ensemble des données disponibles en tirant parti de leurs caractéristiques différentes par fusion de données, éventuellement combinée à des codes de mécanique des fluides. En bref, on utilise le fait que les observations satellites au large permettent de créer assez aisément des roses de vent, alors que les observations satellites à la côte permettent d'obtenir une répartition spatiale instantanée du vent. On cherche à fournir des évaluations des paramètres de Weibull, sous forme de cartes numériques à résolution spatiale meilleure que 1 km, qui soient précises, justes et fiables, et d'une qualité équivalente ou supérieure à celles fournies par les moyens traditionnels. Notre méthode permet une obtention de ces cartes plus rapidement et plus aisément que par des modèles météorologiques locaux. Ce travail s'effectue en collaboration avec les industriels du domaine afin d'aboutir à une mise en oeuvre opérationnelle et devra aboutir à une validation sur un ou plusieurs cas réels.

La connaissance de la ressource énergétique des vagues peut être approchée de la même manière et la méthodologie mentionnée ci-dessus pourrait être étendue ou adaptée afin de fournir des données pertinentes pour le développement des fermes de type hydrolienne (*waveplant*, en anglais). Ces travaux dédiés à l'océan s'inscrivent dans le cadre de l'initiative nationale IPANEMA⁵.

Par ailleurs, d'autres paramètres géophysiques accessibles par les satellites d'observation de la Terre présentent un intérêt pour l'amélioration de la météorologie spécifique au domaine éolien. Deux d'entre eux sont prépondérants dans l'évaluation de la ressource éolienne terrestre : l'altitude du terrain, et la longueur de rugosité aérodynamique. Une base de données mondiale sur l'altitude a été

⁴ Group on Earth Observations (initiative du G8, intégrant 76 pays et 56 organisations internationales visant la mise en place du Global Earth Observation System of Systems sur la période 2005-2015).

⁵ Initiative PArtenariale Nationale pour l'émergence des Energies Marines.

adaptée aux spécificités de l'énergie éolienne ; elle est mise à la disposition des consultants et ingénieurs au moyen du serveur Web DataForWind (3900 accès en 2008), géré par le CEP/OMD. La compréhension des besoins des industriels et la construction de solutions adaptées seront poursuivies.

Ces activités s'inscrivent dans le cadre du programme de travail de la plateforme technologique européenne TPWIND (2006-2010) dont l'axe 1, "Wind energy resources", intègre des activités en lien avec l'utilisation des données d'observation de la Terre.

3.2. Métrologie pour l'expérimentation

L'équipe OMD exploite un savoir qui relève de la physique de la mesure et permet d'appréhender les phénomènes d'intérêt au travers de capteurs acquérant des informations pertinentes dans le temps, l'espace et les modalités d'observation. Ce savoir est depuis plusieurs années appliqué aux expérimentations de laboratoire réalisées par d'autres équipes du CEP : ainsi la vélocimétrie dans les fluides par laser est déjà en cours d'exploitation pour l'étude des boucles fluides (par exemple sur l'expertise de bancs frigorifiques...) ; les techniques d'analyse d'images sont utilisées par exemple pour l'optimisation et le développement d'équipements pour l'étude des structures des écoulements dans la torche à plasma, les chambres de synthèse des aérogels ou les réacteurs de cultures de micro-algues.

Deux tunnels à film liquide ont été réalisés pour l'étude des écoulements bidimensionnels sur des larges gammes de Reynolds et de Mach. Les deux tunnels sont surtout utilisés à des fins d'enseignement, mais ils ont, par exemple, permis la caractérisation du mélangeur à géométrie fractale, développé au CEP, ou encore de reproduire quelques expériences numériques sur les écoulements autour des éoliennes. La conception d'un nouveau mélangeur de nano-poudres, en cours de test dans le réacteur plasma, en a également bénéficié. De nouvelles méthodes de vélocimétrie par interférométrie sont en cours de développement pour ces tunnels.

Une soufflerie à air sera réalisée par le CEP à Sophia Antipolis courant 2009. Elle fait appel à des concepts innovants pour un meilleur rendu des phénomènes d'écoulement autour des éoliennes. Elle servira principalement à l'étude de ces machines, tant pour l'enseignement que pour la recherche.

3.3. Evaluation intégrée des impacts environnementaux

Les indicateurs de développement durable sont des outils indispensables à toute démarche proactive d'éco-conception et à l'établissement de politiques publiques pertinentes de développement durable. Ils exploitent la modélisation des impacts environnementaux à l'aide de méthodes intégrées, considérant leurs dimensions spatiale et temporelle, et leurs liens directs avec la société et l'économie.

L'équipe explore :

- le concept d'analyse de cycle de vie (ACV) de filières et de produits industriels permettant l'intégration géographique et temporelle des impacts environnementaux. Ce concept complète la vision mondialisée du binôme consommation/production. Les premiers travaux ont porté sur l'étude des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques implantés en France avec, entre autres, la cartographie de l'empreinte carbone de ces systèmes ;
- l'identification d'indicateurs d'impacts portant non seulement sur le changement climatique, mais également sur la santé humaine et les écosystèmes ;
- les nouvelles approches d'agrégation permettant ainsi d'intégrer des impacts au-delà du seul « changement climatique ». Une réflexion sur le concept encore balbutiant de l'empreinte environnementale est en cours ;
- la définition et le développement de nouveaux indicateurs de comptabilité environnementale ;
- l'évaluation de scénarios prospectifs de développement intégrant la localisation géographique des impacts environnementaux. Ils nécessitent la mise au point de méthodes de représentation géographique et de fusion d'indicateurs environnementaux avec des données de type économique et social.

On cherche à obtenir un cadre conceptuel de référence pour l'évaluation des impacts environnementaux. Celui-ci permettra de fournir de nouveaux indicateurs objectifs de comptabilité environnementale et d'améliorer le débat technique et sociétal. Il trouvera son application dans le

développement systématique d'une approche intégrée pour l'évaluation de scénarios prospectifs de filières énergétiques et industrielles à l'échelle européenne, voire mondiale. Ce développement exploitera les synergies d'échanges et de fusion de données :

- au niveau environnemental, avec les données locales de potentiel des ressources (énergétiques – fossiles et renouvelables par exemple) ;
- au niveau social, avec les données relatives à la population (densité, revenus ...) ;
- au niveau économique, avec les données relatives au développement actuel et à venir (PIB, niveau d'importations/exportations ...) ;
- au niveau institutionnel, avec l'accès aux réglementations actuelles ou à venir (Protocole de Kyoto, taxes environnementales européennes ...).

Dans un contexte d'échanges de biens et de services à l'échelle mondiale, l'enjeu consiste à répondre aux questions suivantes : quel impact environnemental ? En réponse à quelle demande et/ou à quelle consommation ? A quel endroit ?

Apporter des éléments de réponse à ces questions permettra de contribuer à la définition de stratégies de minimisation de ces impacts.

-oOo-