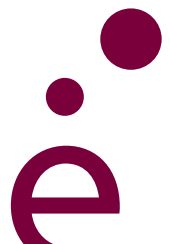
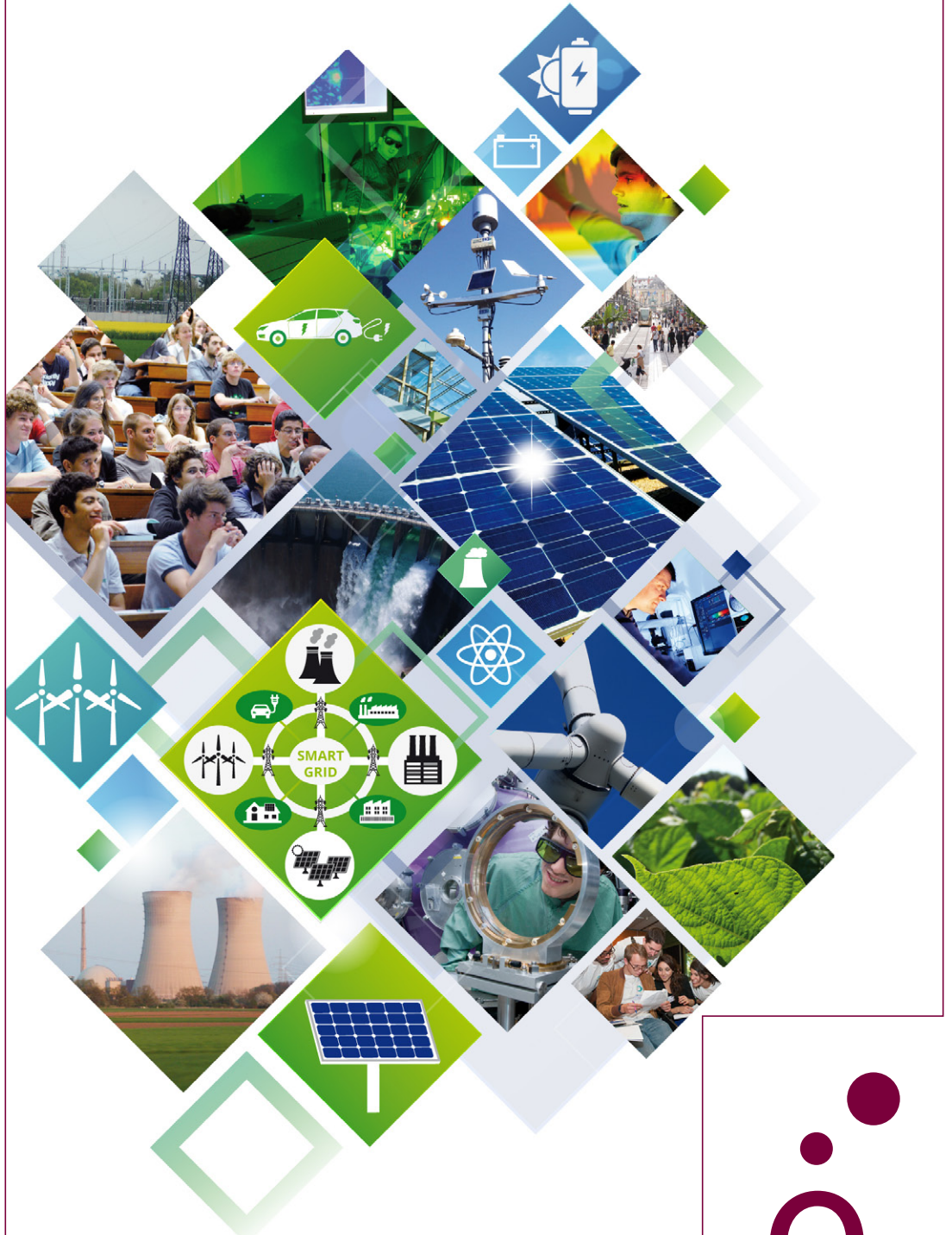


Vers la transition énergétique

WORKSHOP SCIENTIFIQUE DU 4 & 5 OCTOBRE 2016

SYNTHÈSE SCIENTIFIQUE
DES QUATRE SESSIONS SPÉCIALISÉES



SOMMAIRE

Journée du 4 octobre 2016	3
Journée du 5 octobre 2016	4
Les 4 sessions spécialisées	5
• <i>L'énergie solaire photovoltaïque, quels moyens pour quels besoins ?</i>	5
• <i>Quelle place pour l'énergie nucléaire dans la transition énergétique ?</i>	8
• <i>Quels nouveaux leviers pour l'efficacité énergétique industrielle ?</i>	11
• <i>Des véhicules électriques, pour quels usages ?</i>	13
Partenaires et sponsors	16

CONSEIL SCIENTIFIQUE :**Université Paris-Saclay :****François COSTA**

Professeur, laboratoire SATIE (ENS Cachan, CNRS, UPSud...).

Claude DIDRY

Sociologue, DR CNRS, ENS Cachan, Directeur de la Maison des Sciences de l'Homme Paris-Saclay

Françoise LAMNABHI-LAGARRIGUE

DR CNRS, L2S (CentraleSupélec, CNRS, UPSud)

Michel PONS

DR CNRS, LIMSI (CNRS, UPSud)

Pere ROCA i CABARROCAS

Directeur du LPICM et de la FedPV (CNRS, Ecole Polytechnique)

Françoise TOUBOUL

CEA, Conseillère scientifique auprès de l'Administrateur Général

Ecosystème industriel :**Laurent BILLET**

EDF R&D, Délégué scientifique

François COLET

ITE VEDECOM, Chef de projet « Systèmes de Charge Innovants »

Jean-Paul GOURLIA

ITE PS2E, Directeur scientifique

Marianne JULIEN

Air Liquide R&D, Directrice des partenariats scientifiques

Laurent LEGENDRE

Airbus Group, Directeur régional Ile-de-France

COMITÉ D'ORGANISATION :**Jean-Marc AGATOR**

CEA/DAS/Itésé, Chargé de mission

Laurent BILLET

EDF R&D, Délégué scientifique

Frédéric BOUILLAULT

Laboratoire GeePs, Professeur à l'Université Paris-Sud

Sylvain FRANGER

Professeur à l'Université Paris-Sud, responsable de la mention de master Énergie

Patrick GUENOUN

CEA/DRF/IRAMIS, Chef de laboratoire

PROGRAMME

Journée du 4 octobre 2016

13h30-14h30

Ouverture du Workshop• **ACCUEIL**

Jean-Paul CHABARD, Directeur scientifique, EDF Lab Paris-Saclay.

Gilles BLOCH, Président de l'Université Paris-Saclay.

• **CONFÉRENCE INTRODUCTIVE***Grands défis mondiaux, européens, nationaux de l'énergie, dans le contexte post-COP21*

Laura COZZI, IEA, Head of the Energy Demand Outlook Division.

14h30-15h30

TABLE RONDE*Stratégies nationale et européenne : positionnement vers la transition énergétique, vision de la place de l'Université Paris-Saclay*

- Guillaume MEHEUT, Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer.
- Frédéric RAVEL, Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.
- Hervé BERNARD, CEA, European Energy Research Alliance (EERA).
- Yves FORT, Agence Nationale de la Recherche (ANR).
- Daniel CLÉMENT, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME).

15h30-16h15

Pause et session posters (session ouverte à 12h00)

16h15-17h45

State of the art, stakes and potential breakthrough of energy research

- *Perspectives from the US:*
Jonathan ELKIND, US DOE, Assistant Secretary for International Affairs.
- *Overview of the needs of industry:*
Bernard SALHA, Directeur EDF R&D.
- *Perspectives from Public Research:*
Alain DOLLET, ANCRE, DR CNRS.
- *Perspectives from Germany:*
Karl-Friedrich ZIEGAHN, KIT, Head of Division 4, Natural and Built Environment.

17h45-18h30

La réponse du plateau de Saclay aux défis de la transition énergétique

- Julien SORREAU, Etablissement Public d'Aménagement de Paris-Saclay (EPAPS).
- Pierre-Olivier VIAC, Chambre de Commerce et d'Industrie de l'Essonne (première analyse collective du dynamisme des PME franciliennes dans le domaine de la transition énergétique).
- Gilles BLOCH, Université Paris-Saclay (organisation d'initiatives collectives sur l'énergie, annonce du programme du J2).

18h30-18h45

L'énergie en région Ile-de-France

- Invitée d'honneur : Valérie PÉCRESSÉ (*sous réserve*).

18h45-19h30

Cocktail et session posters

LES COMITÉS

Journée du 5 octobre 2016

- 9h00-10h30 **Session spécialisée :**
- 1. L'énergie solaire photovoltaïque, quels moyens pour quels besoins ?*
- PRÉSENTATIONS INTRODUCTIVES :
Rutger SCHLATMANN, PVcom Berlin. & Daniel LINCOT, IPVF.
 - TABLE RONDE (avec les deux experts précédents) :
Philippe DROBINSKI, CNRS, Ecole Polytechnique. | André JOFFRE, TECSOL.
Elvire LEBLANC, CEA. | Laurent SCHMITT, GE Grid Solutions.
- 10h30-11h00 Pause
- 11h00-12h30 **Session spécialisée :**
- 2. Quelle place pour l'énergie nucléaire dans la transition énergétique ?*
- PRÉSENTATIONS INTRODUCTIVES :
Michel MASCHI, EDF R&D. & Franck CARRÉ, CEA.
 - TABLE RONDE (avec les deux experts précédents) :
Patrick BLANC-TRANCHANT, CEA. | Jean-Paul LABARTHE, EDF R&D.
Habibou MAITOURNAM, UMR IMSIA. | Morello SPERANDIO, AREVA.
- 12h30-13h30 Remise des prix des meilleurs posters (séance plénière)
Buffet déjeunatoire
- 13h30-15h00 **Session spécialisée :**
- 3. Quels nouveaux leviers pour l'efficacité énergétique industrielle ?*
- PRÉSENTATIONS INTRODUCTIVES :
Laurent LEVACHER, EDF R&D. & Jean-Paul GOURLIA, PS2E.
 - TABLE RONDE (avec les deux experts précédents) :
Fabrice DEL CORSO, Air Liquide. | Eliane FOURGEAU, Dassault Systèmes.
Hedi ROMDHANA, AgroParisTech. | Bernard YANNOU, CentraleSupélec.
- 15h00-15h30 Pause
- 15h30-17h00 **Session spécialisée :**
- 4. Des véhicules électriques, pour quels usages ?*
- PRÉSENTATIONS INTRODUCTIVES :
Vanessa PETROUTCHOUK, Aéroports de Paris / Jean-Luc CHARRON,
Fédération Française Aéronautique. & Tommaso PARDI, Gerpisa, CNRS.
 - TABLE RONDE (avec les trois experts précédents) :
Vincent GOURLAOUEN, Air Liquide. | Didier JAMET, CEA-LITEN.
Jean-Louis LEGRAND, Vexper. | Steve PÉGUET, ATOS France.
- 17h00-17h30 **CONCLUSION DU WORKSHOP**
- Quelles perspectives scientifiques sur le plateau de Saclay ?*
- Courte synthèse des échanges de la journée, par le comité scientifique.
 - Présentation scientifique : Thibault CANTAT, CEA, ERC.
- 17h30 **CLÔTURE DU WORKSHOP**

SYNTHÈSE SCIENTIFIQUE DE LA SESSION SPÉCIALISÉE N°1 :

1. L'énergie solaire photovoltaïque, quels moyens pour quels besoins ?

Les énergies renouvelables, dont l'énergie solaire photovoltaïque (PV), se développent de façon importante au niveau mondial. La capacité installée d'énergie photovoltaïque dans le monde est proche de 250 GW. Elle couvre aujourd'hui plus de 1% de la demande d'électricité mondiale, avec près de 8% dans certains pays comme l'Allemagne et l'Italie. Cela conduit le réseau à devoir absorber, à certains moments de la journée, davantage d'énergies, intermittentes, que ne le demande la consommation, d'où l'importance de développer en parallèle des moyens de stockage adaptés.

Le potentiel de développement du solaire PV est d'autant plus important que les coûts de production de l'électricité pour des centrales au sol ont atteint des seuils très bas (récemment 0,02€/kWh à Abu Dhabi). Les coûts ont également baissé pour les secteurs résidentiels et le secteur industriel, rendant de plus en plus économique «l'autoconsommation» : consommer l'énergie solaire qu'on produit en optimisant cette consommation grâce à des systèmes de gestion intelligente de l'énergie, en négociant les surplus pour ses voisins, dans une approche réellement collective.

Comment assurer le succès technologique, économique, social et environnemental pour que le PV devienne un pilier dans le futur mix énergétique ? Deux défis majeurs sont à relever dans un proche avenir : la technologie proprement dite incluant le stockage et la sécurité de la gestion des données.

1) Technologie du PV et stockage

- **Améliorer les équipements** : Le succès actuel repose d'un côté sur une amélioration continue des performances et de la fiabilité des cellules solaires, issues de décennies d'avancées de la R&D, alternant des ruptures scientifiques et des séquences de consolidation, et de l'autre côté, en particulier dans la dernière décennie, sur l'effort industriel pour la production massive de systèmes photovoltaïques, qui a réduit de manière impressionnante les coûts de production par les effets d'échelle et de retours d'expérience. Il faut maintenant **poursuivre l'amélioration des technologies actuelles à base de silicium cristallin et de couches minces** en augmentant leur rendement vers la limite théorique d'environ 30% avec des coûts de production faibles et des technologies à grande échelle. Il faut ensuite relever le prochain défi qui vise à porter le rendement au-delà de 30% en introduisant des **concepts en rupture**. Un concept clé est celui de combiner des dispositifs actuels (Si, couches minces) avec une jonction supérieure qui fonctionne bien dans la gamme UV du spectre solaire. Cette approche dite en tandem a l'avantage de bénéficier des technologies actuelles, mais a besoin d'un effort immense de R&D pour créer la jonction UV et fabriquer l'ensemble à un coût compétitif. Cet objectif constitue l'épine dorsale de la stratégie de l'IPVF (Institut Photovoltaïque d'Ile-de-France).

Quels moyens ? «Renforcer les efforts mondiaux de recherche pour produire des modules photovoltaïques avec un rendement > 30% pour les modules, un prix < 30c\$/Wc à l'horizon 2030 : [30/30/30]», c'est la feuille de route proposée par l'IPVF et soutenue par les représentants des principaux instituts de recherche dans le domaine du solaire photovoltaïque. Combiné aux innovations sur les autres

composantes du système PV et aux développements du stockage et du numérique qui faciliteront l'intégration du PV dans le système électrique, cet objectif ambitieux permettra de contribuer efficacement aux enjeux mondiaux de la lutte contre le réchauffement climatique.

- **Pour anticiper la production en énergie photovoltaïque**, une prévision précise de **la ressource solaire** à différents intervalles de temps, de quelques dizaines de minutes à quelques jours est nécessaire. La prévision du rayonnement solaire est un véritable défi en raison des limites existantes dans la compréhension de la microphysique des nuages et de l'effet des aérosols comme la poussière, le rayonnement solaire et la formation des nuages. Outre la ressource solaire, il est important **d'évaluer et optimiser les performances du module PV** dans un environnement réel. Toutes ces problématiques exigent une approche multidisciplinaire.

Quels moyens ? La valeur de l'énergie photovoltaïque n'est pas limitée à la production. Elle s'étend au système intégré avec une fonctionnalité (toiture, surface d'immeuble, vitrage ou route) et aux services associés (prévision de production et de demande, autoconsommation, vente d'électricité). Capturer cette valeur implique une expertise multiple et une rencontre entre les acteurs de différents domaines, comme le stockage de l'énergie, le numérique et les réseaux d'énergies. C'est l'approche réalisée au CEA, avec l'INES et ses partenaires industriels.

- **Stockage** : Le coût du stockage sous forme de batteries pourrait être encore divisé par 2 d'ici 2025 selon l'agence Bloomberg, soit moins de 200 \$ pour acquérir un pack de 1 kWh. Le stockage électrochimique sera donc de plus en plus présent dans notre environnement (véhicules électriques et hybrides, batteries domestiques et de plus en plus d'objets connectés). Selon l'usage ou le domaine d'application, Les exigences pour la prochaine génération de batteries sont d'augmenter la densité de l'électricité stockée et d'optimiser la durée de vie.

Quels moyens ? La France dispose d'une plateforme de conception et de test des batteries (CEA Grenoble et Chambéry) qui constitue un outil de R&D pionnier en Europe. L'amélioration des performances (densité d'énergie embarquée, durée de vie) est obtenue par une approche globale, incluant synthèse et nano-structuration des matériaux, assemblage en pack et système intelligent de gestion de l'énergie (batterie management system). Dans les cas où les batteries ne sont pas adaptées, d'autres solutions telles que les STEP (stockage d'énergie par pompage turbinage) et la conversion de l'électricité en source gaz (hydrogène par exemple) pourront également être mises en œuvre. L'interconnexion des réseaux (électricité, gaz, chaleur) pourra se faire par une gestion intelligente de l'énergie grâce au partage des données.

2) Gestion des données

Pour faire face aux nouveaux besoins de flexibilité du système électrique et de la résilience de ces systèmes aux catastrophes naturelles, il est nécessaire **de faire évoluer nos solutions logicielles de pilotage pour les interfacier à de nouveaux points de contrôle et de pilotage diffus** – qu'il s'agisse de production diffuse, d'effacement, de stockage ou de véhicules électriques – et donc, de facto, d'intégrer de nouvelles sources de données amenées à croître exponentiellement dans les années à venir. Le compteur évolué est un exemple concret de cette tendance, sachant que ce dernier est une des premières options clés pour interfacier ces nouveaux gisements de flexibilité diffus. En parallèle, les nouveaux objets issus du monde de l'Internet (IoT – Internet of Things) amènent d'autres options souvent complémentaires, comme les thermostats ou les bornes de recharge intelligentes.

Il sera possible de distribuer et de vendre son énergie solaire à tous les habitants d'un même immeuble et à ceux des immeubles voisins dans son quartier. Il sera aussi possible d'utiliser sa propre énergie solaire en itinérance pour recharger son véhicule électrique moyennant bien sûr une contribution au réseau public (péage), désormais ouvert à de multiples opérateurs. **Des solutions de pilotage à ces nouveaux flux de données**, en veillant à respecter strictement la confidentialité des données associées, sont nécessaires. Cette nouvelle ouverture rend ces systèmes **plus vulnérables aux attaques tant internes qu'externes**. Les réseaux électriques comptant parmi les infrastructures les plus critiques, il faut renforcer la **sécurité de ses systèmes** en veillant à prendre en compte leur architecture de bout en bout et à doser le bon niveau de sécurité à chacun des niveaux de l'architecture.

Quels moyens ? Par exemple GE contribue à la mise en œuvre de nouvelles normes et recommandations qui sont aujourd'hui intégrées dans les feuilles de route des plates-formes d'automatismes et des solutions de pilotages énergétiques. Elles donnent lieu au développement de nouveaux composants technologiques et de déploiement de démonstrateurs comportant des micro-réseaux (intégrant quelques milliers de clients) et utilisant des informations «ultra temps réel» des compteurs évolués associés à des gisements diffus. GE a récemment fourni une plate-forme Smart City Energy à l'Institut de recherche technologique SystemX, à laquelle contribuent différents acteurs dont GDF Suez, Alstom Transport, CoSMo et G2Mobility. L'objectif de cette plate-forme - interfacée avec des objets intégrés aux systèmes énergétiques tels que les compteurs évolués, des sous-compteurs électriques associés à des gisements de flexibilité diffus, des bornes de recharge intelligentes et des thermostats intelligents - est de permettre une gestion «ultra temps réel des objets énergétiques» et vise à renforcer les capacités de «Machine learning» issues de ces données. De nombreuses start-ups de l'IoT et du digital s'intéressent d'ailleurs à la question. La sécurisation des données et leur confidentialité est un enjeu essentiel, de même que les flux d'électricité entre acteurs doivent être sécurisés. L'état de l'art permet de le faire sur des flux modestes. Le défi à relever est de garantir la sécurité d'un grand flux de données sur un réseau interconnecté complexe (internet, Internet of Things, internet de l'énergie). Des laboratoires de recherche comme le CEA ou le MIT y travaillent, en particulier par des technologies de cryptographie homomorphe ou cryptage quantique.

Conclusion :

Le solaire photovoltaïque, associé au stockage de l'énergie et au numérique, bénéficie de la conjonction de réduction des coûts dans ces différents domaines et du très fort potentiel de développement des services qui peuvent y être associés. L'Université Paris-Saclay, en collaboration avec ses institutions membres fondateurs, est un cadre unique pour aller de l'avant sur ces défis.

SYNTHÈSE SCIENTIFIQUE DE LA SESSION SPÉCIALISÉE N°2 :

2. Quelle place pour l'énergie nucléaire dans la transition énergétique ?

La réponse à cette question est différente selon les échelles de temps et d'espace.

En France à moyen terme (horizon 2030), les grands acteurs de la filière nucléaire que sont EDF, le CEA et AREVA considèrent unanimement que le nucléaire continuera à occuper une place essentielle dans le mix énergétique français : à la fois socle de la production (plus de 50% jusqu'en 2025), stabilisateur du réseau et levier potentiel important pour tenir les objectifs de décarbonation des usages de l'électricité de la COP21 (par exemple en permettant de renforcer les usages de la voiture électrique et des pompes à chaleur). Cette énergie reste en outre un des atouts économiques de notre pays dans la mesure où le prix de l'électricité en France reste encore un des plus attractifs d'Europe. Pour que cette situation soit maintenue de façon viable, il faudra néanmoins répondre à 2 challenges.

Le premier challenge est celui de l'accroissement de la manœuvrabilité des centrales nucléaires. Le mix énergétique électrique, va en effet évoluer d'une situation de forte prédominance de l'énergie nucléaire à une situation plus équilibrée par le développement exponentiel de moyens de production ENR (parc éoliens et photovoltaïques). Ces moyens de production fortement intermittents solliciteront davantage le réseau électrique et demanderont au nucléaire, chargé de rétablir l'équilibre du réseau, une plus forte capacité de variation de puissance instantanée.

Le deuxième challenge est celui de la prolongation de la durée de fonctionnement des centrales nucléaires, avec une valeur cible à 60 ans qui permet de préserver leur forte efficacité économique.

La réponse à ces 2 challenges se fera par une **mobilisation de la R&D de la filière** selon un processus d'amélioration continue déjà en œuvre depuis de nombreuses années et qui s'appuie sur des études de R&D et de compréhension des phénomènes dans les domaines

- de la **physique des champs** :
 - mécanique, matériaux, thermo-hydraulique pour les études sur la tenue des composants,
 - neutronique, matériaux pour les études sur le vieillissement, la manœuvrabilité et le stockage des déchets ;
- des **grands codes de calculs** (ASTER, CAST3M et mécanique, SATURNE en mécanique des fluides, CATHARE en thermo hydraulique, EUROPLEXUS en dynamique rapide, APOLLO en neutronique,...), outils de base pour la prédiction de situations difficilement réalisables comme celle des accidents graves et de justification des installations ; ces codes sont réalisés et utilisés dans une logique de collaboration forte allant jusqu'au co-développement en Open Source sur la base de plates-formes intégratrices telles que SALOME. Ces plates-formes permettent de mener des études multi-physiques complexes (par exemple chainage depuis la forge jusqu'au composant) tout en donnant des moyens puissants pour valider les codes de calcul et étudier la propagation des incertitudes ;

- des **grands moyens de calcul** avec la nécessité d'adapter en continu l'efficacité des codes à l'évolution des nouvelles architectures informatiques ;
- des **grands moyens d'essais** pour la validation des modèles de connaissance et du comportement des composants à l'échelle 1 ;
- des **sciences humaines et sociales** pour le management des risques industriels (sûreté, sécurité, radiologique,...) et l'amélioration des organisations et des performances des centrales nucléaires actuelles et futures (en exploitation, au cours des arrêts de tranche, lors des grands programmes de maintenance et en situation de crise).

Dans ces domaines la synergie est forte entre les acteurs du plateau, notamment entre EDF, le CEA et AREVA, via l'**institut tripartite**, Institut de recherche sur le nucléaire qui coordonne les efforts de recherche des 3 partenaires. Deux laboratoires communs du plateau jouent également un rôle très important d'apport de connaissance et de dialogue recherche académique-industrie dans le domaine des sciences mécaniques, domaine vital pour la justification de la sûreté des installations. Il s'agit de l'**IMSIA** (études des structures industrielles durables) et de l'**institut SEISME** (études d'impact sismique). Par ailleurs, la présence actuelle ou future sur le plateau de très **nombreuses grandes écoles ou centres universitaires** (ENSTA, Ecole Polytechnique, MdS (Maison de la simulation) Université Paris Sud, CentraleSupélec, ENS Cachan,...) sera évidemment favorable aux avancées nécessaires dans l'ensemble des sciences de l'ingénierie nucléaire. Enfin dans le domaine des sciences humaines et sociales, il faut souligner la création récente sur le plateau de la MSH (**Maison des Sciences de l'Homme**).

A l'international ou à plus long terme, la situation est différente et plus contrastée.

Au niveau mondial, le nucléaire reste un atout majeur pour respecter l'objectif de +2°C fixé par la COP21, en garantissant, avec une quasi absence d'émissions de CO₂, la fourniture d'une énergie disponible et programmable. L'AIE évalue à 930 GWe (comparativement à 370 GWe aujourd'hui) la puissance nucléaire qu'il sera nécessaire de disposer en 2050. Dans un tel contexte international, la filière nucléaire française se trouve néanmoins dans une position de forte compétition, soit vis-à-vis des réacteurs nucléaires conçus par les constructeurs étrangers, soit vis-à-vis des futurs nouveaux moyens de production issus de la transition énergétique. Pour tirer son épingle du jeu, l'industrie nucléaire française devra alors **miser sur l'innovation et la rupture**.

La rupture pourra venir des nouvelles technologies de fabrication comme la compression isostatique de poudres métalliques à chaud et la synthèse additive (impression 3D métallique) qui pourront permettre d'envisager la réalisation de composants à la demande. Un gros effort reste à faire dans ce domaine cependant pour qualifier ces nouveaux procédés et codifier les règles de conception des produits qui en seront issus.

La rupture pourra venir par ailleurs de nouvelles filières de réacteurs (SMR) plus petits, plus compacts, plus standardisés, plus flexibles et mieux adaptés au pays moins enclins à investir dans de grands projets capitalistiques. Pour EDF, la technologie la plus prometteuse dans ce domaine reste celle des réacteurs à eau pressurisée mais il convient de mener également une veille active sur l'ensemble des filières possibles.

La rupture pourra venir ensuite des nouveaux objets et concepts issus de la révolution du numérique :

- Mise en place de réseaux de capteurs intelligents et de moyens de simulation 3D puissants pour l'aide au pilotage des centrales nucléaires en temps réel ;
- Utilisation des techniques de réalité virtuelle ou augmentée et de data mining pour optimiser la maintenance ; grâce, par exemple, à des clones numériques de bâtiments réacteurs on pourra tester, avant les interventions, des scénarios numériques pour définir la configuration des chantiers, affiner les analyses de risques et prévoir les parades appropriées, gérer les co-activités, se former et s'entraîner.

La rupture pourra venir également des nouvelles méthodes d'organisation et des nouveaux moyens d'association des acteurs du tissu industriel (telles que la démarche d'Open Innovation entreprise chez AREVA avec le projet Innovation PME) ou de la mise en place de méthodes en circuit court (ingénierie concourante) pour le développement des immenses systèmes que sont les centrales nucléaires.

Enfin, selon le CEA, la rupture pourra venir d'une utilisation innovante des réacteurs nucléaires actuels ou futurs. On peut citer l'utilisation de la chaleur basse température produite par le circuit tertiaire du réacteur pour réaliser de la cogénération ou bien la réalisation de la synthèse de carburants tels que l'hydrogène ou le méthane pour utiliser au mieux la puissance des réacteurs pendant les périodes de sous-charge prévisibles lors des forts pics de production des énergies renouvelables. Les réacteurs à neutrons rapides de nouvelle génération tels qu'ASTRID sont, quant à eux, destinés à démontrer les performances d'une filière capable d'inscrire le nucléaire dans la très grande durée grâce à une gestion optimisée du cycle des combustibles.

Plus loin encore, à très long terme, le projet ITER représente une étape importante dans la maîtrise espérée de l'énergie de fusion. Dans ce domaine, trois verrous importants restent à lever : l'auto allumage du plasma, la récupération (dans une optique d'utilisation thermodynamique) de la chaleur produite par la réaction de fusion, la régénération du tritium, isotope combustible qui n'existe pas dans l'environnement naturel.

SYNTHÈSE SCIENTIFIQUE DE LA SESSION SPÉCIALISÉE N°3 :

3. Quels nouveaux leviers pour l'efficacité énergétique industrielle ?

L'efficacité énergétique dans l'industrie représente un axe majeur pour répondre aux enjeux du changement climatique. Mais, par rapport à d'autres secteurs économiques, la complexité et la diversité des systèmes qu'il s'agit de faire progresser rendent la démarche difficile. Peu de synergies technologiques existent entre des secteurs tels que l'agroalimentaire, la chimie, voire les industries des métaux.

Dans les années 70, les efforts portaient principalement sur les composants technologiques (fours, chaudières, échangeurs de chaleur,...), dans les années 90 sur la notion d'intégration de procédé.

Les nouveaux challenges portent maintenant sur :

- **La notion de flexibilité**, nécessaire pour répondre à la variabilité de l'offre, en particulier de l'offre électrique, et pour adapter à tout moment le fonctionnement des usines à l'évolution de la demande sans subir de pénalités énergétiques ;
- **L'extension vers la notion d'écoparc**, concept consistant à promouvoir la mise en place de synergies sur l'énergie et la matière entre différents sites industriels ; ce développement de ce concept d'économie circulaire est extrêmement complexe et présuppose la mise au point de méthodologies sophistiquées capables de garantir la flexibilité à tous les acteurs concernés ; cette approche n'est pas développée en France même si d'anciens gros centres industriels vendus par spécialités ont gardé les moyens communs initiaux.

Pour répondre à tous ces besoins, **la transformation numérique constitue l'enjeu majeur de la dynamique économique et de la performance des entreprises dans les prochaines années**. Premières industries à adopter le numérique massivement dans leurs procédés de conception et de production, l'Aéronautique, la Défense et l'Automobile ont réalisé une véritable révolution de leur écosystème d'entreprise, grâce au numérique.

Cette mutation digitale s'étend aujourd'hui à tous les secteurs, l'industrie des procédés spécifiquement, mais aussi ceux jusqu'alors les plus en retrait vis-à-vis du numérique, à savoir par exemple le bâtiment ou la ville.

Du fait de la complexité des systèmes concernés, de plus en plus distribués, communicants et à dominante logicielle, du fait aussi de contraintes énergétiques, environnementales et normatives foisonnantes, **l'effort numérique s'intensifie sur le processus transverse de conception multidisciplinaire des entreprises**. Il met progressivement fin à l'approche de conception par «silo» qui a gouverné ces dernières décennies les méthodes d'ingénierie des systèmes complexes.

La démarche **d'ingénierie système numérique** est à ce titre un élément moteur d'accélération de la transformation numérique. Elle permet de rassembler les acteurs de la conception autour des **architectures** de système, de capitaliser le savoir de l'entreprise dans des **modèles**, le partager, le réutiliser, le gérer dans le temps. La **modélisation et la simulation numériques** permettent à tous les acteurs de la conception de **raisonner** ensemble sur le système et ses parties, pour l'optimiser le plus tôt possible dans le cycle de conception, prendre les bonnes

décisions et actionner les bons compromis.

L'*Expérience virtuelle* du système allège ses coûts de test et de validation, elle accélère l'innovation.

A titre d'exemple, deux projets en cours illustrent l'importance de cette conception par approche système :

- **Une usine école dite ICO** (Innovation Center of Operations), conçue par BCG en partenariat avec CentraleSupélec, vient d'ouvrir ses portes non loin du plateau de Saclay ; deux chaînes de production sont déjà opérationnelles avec des solutions qui illustrent les potentialités de l'usine du futur ; CentraleSupélec (LGI) va notamment étudier la gestion de l'énergie dans ces systèmes/unités de production qui doivent pouvoir réguler leur consommation à la demande du fournisseur d'énergie ; il souligne que malgré des progrès dans la gestion de l'énergie au niveau du SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) et du MES (Manufacturing Executive System), on ne sait toujours pas à ce jour définir de stratégies de planification et d'ordonnancement pour s'adapter à un profil de consommation énergétique ;
- **La conception d'une usine de dessalement dans un pays du Golfe** va consister à modéliser des architectures avec des configurations différentes de systèmes de production d'énergie en entrée (champs de production éolienne, de solaire photovoltaïque,...), différents étages de systèmes de dessalement avec différents types de technologies, de manière à assurer un débit d'eau potable en sortie ; il faut associer à chaque architecture ou configuration du système des modèles de performances de fiabilité, débit, durée de vie, maintenance, impact environnemental et coût global pour réaliser une optimisation robuste en fonction des conditions opératoires, avant même de concevoir en détails le contrôle-commande.

Cette évolution numérique ne se cantonne pas à la seule phase de conception : les problématiques de partage des tâches entre un homme et un robot sensés coopérer au sein d'un atelier de kitting par exemple (atelier de pré-montage de sous-assemblage en bord de chaîne automobile), a priori ou en dynamique, vont devoir être étudiées.

Si la composante numérique est un axe majeur, **les démarches plus «classiques» restent d'actualité :**

- **Les technologies gagneraient à faire l'objet d'une approche «produit»** pour une mise sur le marché ; elles doivent tenir compte du contexte énergétique global (énergie peu chère, besoins croissants de flexibilité pour les électro intensifs,...), des usages des clients et des systèmes dans lesquels elles vont s'insérer ; seule une collaboration multisectorielle ouvrirait la porte vers des briques technologiques moins chères et utilisant les avancées dans différents secteurs de la recherche fondamentale (matériaux, thermohydraulique,...) ;
- **Les outils d'intégration de procédé ou les études d'ACV apportent une connaissance plus complète** sur l'impact énergétique global d'une prise de décision ou d'un développement.

Conclusion :

L'**efficacité énergétique** au sens large du terme est un thème qui doit fédérer tout un écosystème de grandes et petites entreprises autour du **partage** et de l'**échange** de modèles numériques comportementaux des dispositifs énergétiques, autour des concepts de briques technologiques. Il faut continuer à encourager cette dynamique collaborative.

SYNTHÈSE SCIENTIFIQUE DE LA SESSION SPÉCIALISÉE N°4:

4. Des véhicules électriques, pour quels usages ?

La voiture particulière électrique est un sujet particulièrement visible du grand public. D'autres usages de la mobilité électrique sont possibles comme par exemple l'avion de tourisme, les bus ou les bateaux.

La question de l'usage est clé pour l'adoption de cette nouvelle technologie à plusieurs titres. Plus les performances d'usage des véhicules sont élevées par rapport aux technologies actuelles, plus l'adoption par les utilisateurs privés ou par les grands acteurs économiques se fera rapidement, permettant ainsi aux acteurs de la filière de financer leurs développements. Ainsi, le groupe Aéroports de Paris souhaite favoriser l'usage de l'avion électrique et le développement d'une infrastructure aéroportuaire adaptée, notamment des bornes de recharge électrique (ex. solution de recharge en hydrogène de la société PowiDian). L'usage de la voiture électrique est aussi facilité pour l'accès des passagers aux parkings publics des aéroports.

Dans le cas d'un véhicule particulier, du point de vue de l'utilisateur, sa **«performance d'usage»** se définit par une capacité de transport, une autonomie en kilomètre, des conditions de sécurité et de confort, des contraintes liées à l'accès à des sites de recharge en énergie (trajet supplémentaire, incertitude, temps d'immobilisation du véhicule, temps consacré par le chauffeur,...). Comment faire en sorte que le véhicule électrique soit une solution plus performante en termes d'usage ? La technologie apporte une réduction du bruit, une conduite différente plus réactive.

Si le véhicule est **équipé d'une pile à combustible à hydrogène**, son autonomie est importante, son remplissage est rapide - en ceci l'usage diffère peu d'un véhicule actuel - néanmoins les premiers usagers devront savoir utiliser un réseau de stations de recharge peu dense, même avec des applications digitales bien faites, les usagers précurseurs seront défavorisés.

Si le véhicule est **équipé d'une batterie**, sa recharge peut se faire la nuit dans un parking ou à domicile, avec un gain d'usage par rapport à la recherche d'une station. Néanmoins, son autonomie est réduite, même si elle commence toutefois à s'améliorer (annonce du doublement de l'autonomie de la Zoé de Renault pour 22 kg embarqués en plus, soit 400 km). Son usage est à privilégier pour des trajets du quotidien avec retour à un point de recharge le soir.

L'utilisateur souhaitant acquérir un véhicule électrique a donc des renoncements à faire, à moins qu'il devienne un usager d'un autre genre et décide de ne pas acquérir le véhicule, ce qui correspond à un autre cas d'usage, celui d'un utilisateur de **véhicules mis à disposition** (loueur, auto-partage commercial type autolib, flotte d'entreprise,...).

Et si le déploiement de véhicules électriques, plus chers à l'achat que les véhicules actuels, nécessitait également le développement de **solutions d'auto-partage entre particuliers** ? L'utilisateur s'affranchirait alors de la question du choix du véhicule adapté à sa situation. Il en changerait au gré de ses besoins.

Cette approche par les usages montre que les progrès technologiques sur la batterie ou la pile à combustible permettant de réduire les coûts ne sont pas les seuls enjeux de l'adoption par les utilisateurs de véhicules électriques. La mise en place d'une **«solution globale»** intégrant véhicules, logements, parkings, stations de recharge rapide est nécessaire.

Une fois que le système est pensé et optimisé pour les utilisateurs, il s'agit ensuite de le financer, en veillant à ce que le **coût d'usage** soit **cohérent avec la performance d'usage**.

Cette solution globale doit alors s'intégrer dans un système énergétique global pouvant assurer la mise à disposition de l'électricité ou de l'hydrogène aux points nécessaires sans risque de rupture d'approvisionnement (ou d'impact sur le réseau électrique).

Cette approche système est complexe et spécifique à un lieu donné et une **recherche en sociologie de l'usage** de l'énergie doit être mise en œuvre.

C'est pourquoi le déploiement de véhicules électriques nécessite une coordination des acteurs d'un territoire, par exemple celui du plateau de Saclay où des projets précurseurs sont d'ores et déjà à l'étude. C'est le cas de l'avion électrique sur l'aéroport de Toussus-Le-Noble pour les vols locaux de qualification ou d'apprentissage, qui ne nécessitent qu'une autonomie énergétique réduite, ou de véhicules à hydrogène (voitures, bus, navettes, bennes à ordures ménagères) alimentés par une ou plusieurs stations sur le plateau.

Enfin, la recherche technologique doit viser de nouvelles ruptures, concernant notamment :

- L'augmentation de la densité d'énergie des batteries (nouveaux matériaux) et la résolution des problèmes liés à leur sécurité ;
- L'augmentation de la durée de vie des piles à combustible (phénomènes de dégradation) et la diminution de la quantité de platine (ou la mise au point d'autres catalyseurs) ;
- La réduction des coûts des pièces et systèmes de façon à réduire l'écart de prix de ces nouveaux véhicules par rapport aux véhicules à moteur à combustion.

Elle doit aussi développer des **innovations au niveau du système** dont «l'intelligence» pourra tirer le meilleur parti de la technologie et ce dans plusieurs axes comme le passage d'un modèle de possession à un modèle d'usage ou celui permettant d'associer mobilité, habitat, ville, services et énergie.

Pour revenir au véhicule électrique lui-même, l'enjeu maintenant porte sur sa **connexion, via des services numériques, à son écosystème ou à un smartphone**. Quant au véhicule électrique autonome, il représente une véritable révolution déjà en marche.

Conclusion :

Les progrès technologiques sur la batterie ou la pile à combustible permettant de réduire les coûts et d'augmenter les performances sont certes nécessaires mais ne sont pas les seuls enjeux de l'adoption par les utilisateurs de véhicules électriques. La mise en place d'une «**solution globale**», sur la base d'une analyse sociologique fine des utilisateurs, permettra d'intégrer les choix de conception sur les véhicules, logements, parkings et stations de recharge. Cette approche système à l'échelle d'un territoire permet en outre de prendre en compte les contraintes et besoins du réseau énergétique local.

NOTES

WORKSHOP SCIENTIFIQUE SUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE 2016 (WTE 2016)

4 - 5 OCTOBRE 2016

Première rencontre Industrie-Recherche-Formation

Lieu : EDF Lab Paris-Saclay
Centre de R&D
Boulevard Gaspard Monge
91120 Palaiseau

LES PARTENAIRES DE L'ÉVÈNEMENT :

université
PARIS-SACLAY



en coopération avec la CCI ESSONNE

LES SPONSORS PRINCIPAUX :



LES AUTRES SPONSORS :



En complément (Forum d'étudiants du 4 octobre 2016 au même endroit) :

